

Etude du comportement du « lift » lors de la combustion du mélange CH₄-Air soumis à un gradient magnétique

Virginie Gilard¹², Thomas Delamere¹, Pascale Gillon¹,
Brahim Sarh¹², Jean-Noël Blanchard¹²

¹ ICARE, UPR 3021 ST2I-CNRS

1c Avenue de la Recherche Scientifique, Orléans cedex 02 France

² IUT ORLEANS

Rue d'Issoudun – BP 6729 – Orléans cedex 02 France

email : blanchard@cns-orleans.fr

Résumé :

On se propose ici de mettre en évidence les effets développés par la présence d'un champ magnétique sur le « lift » d'une flamme de diffusion (constituée d'un jet de méthane dans un co-courant d'air). Le phénomène de décollement de flamme (ou « lift ») est clairement identifié dans la littérature comme étant lié à une valeur critique de la vitesse du carburant (par rapport à la vitesse du comburant). A partir de cette vitesse critique, la flamme n'est plus attachée au brûleur et peut, notamment en raison de l'augmentation des vitesses, être alors soufflée. Avant le soufflage, la position de la flamme dépend des actions combinées du mélange aérodynamique à l'amont de la flamme, ainsi que des phénomènes thermiques et chimiques liés au transport moléculaire. A partir de résultats expérimentaux obtenus par des techniques optiques non-intrusives, on montrera que la réduction du lift de la flamme est étroitement liée à la présence d'un fort gradient magnétique qui induit une force magnétique agissant sur les molécules paramagnétiques.

Abstract :

One proposes here to study the effects developed by the presence of a magnetic field on the lift-off of a diffusion flame (composed of a methane jet in a coflow of air). The phenomenon of lift-off is clearly identified in the literature as being related to a breaking value the speed of the fuel (compared to the speed of combustive). From this critical speed, the flame is not any more attached to the burner and can, in particular because of the increase in speeds, being then blows out. Before blowing, the position of the flame depends on the actions combined of the aerodynamic mixture with the upstream of the flame, as well as thermal and chemical phenomena related to molecular transport. From experimental results obtained by not-intrusive optical techniques, one will show that the reduction of the lift-off of flame is closely related to the presence of a strong magnetic gradient which induces a magnetic force acting on the paramagnetic molecules.

Mots-clefs : Combustion – Champ magnétique - Lift

1 Introduction

Depuis Faraday (1847), de nombreuses études à fortes obédiences expérimentales (Ueno *et al.* (1987), Mizutani *et al.* (2001), Yamada *et al.* (2003)) ont montré qu'un moyen efficace de contrôle de la combustion pouvait être l'emploi d'un champ magnétique. Ces différents travaux ont notamment permis de mettre en évidence que la non homogénéité spatiale des champs magnétiques influait sur le comportement des flammes par le biais des caractères paramagnétiques (oxygène contenue dans l'air) et diamagnétiques (CH₄, CO₂, CO, NO_x) des différentes espèces liées à la combustion. Une substance paramagnétique est une substance qui sera attirée vers les champs magnétiques croissants et une substance diamagnétique (gaz de flamme) repoussée vers les champs magnétiques décroissants. En effet, la force magnétique agissant sur une unité de volume d'une substance *i* est telle que : $F_i = (1/2\mu_0)\rho Y_i \chi_i \nabla(B^2)$ où ρ est la masse volumique, χ_i est la susceptibilité magnétique de l'espèce *i* (de signe positif pour les substances paramagnétiques et de signes négatif pour les substances diamagnétiques) et $\nabla(B^2)$ le gradient magnétique. On se propose ici d'étudier l'influence d'un champ magnétique sur le lift

d'une flamme de diffusion méthane-air pour laquelle le mélange et la combustion se produit simultanément. Une large gamme de mélange (mélange pauvre à riche) ainsi que 2 positions de sortie du brûleur par rapport au maxima positif du gradient magnétique sont étudiés.

2 Dispositif expérimental et conditions d'essais

L'étude expérimentale est menée à partir de la formation d'une flamme de diffusion issue d'un brûleur qui assure l'alimentation en air et en méthane à partir de deux jets de gaz axisymétriques et coaxiaux (cf. figures 1 & 2).

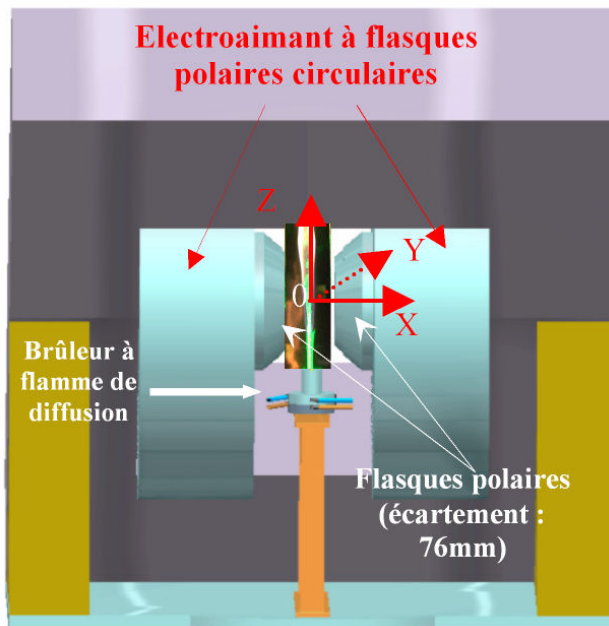


FIG. 1 – Dispositif expérimental

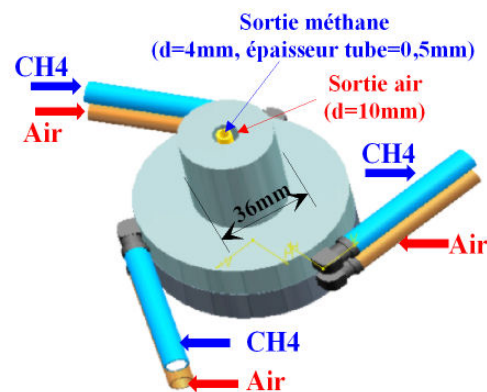


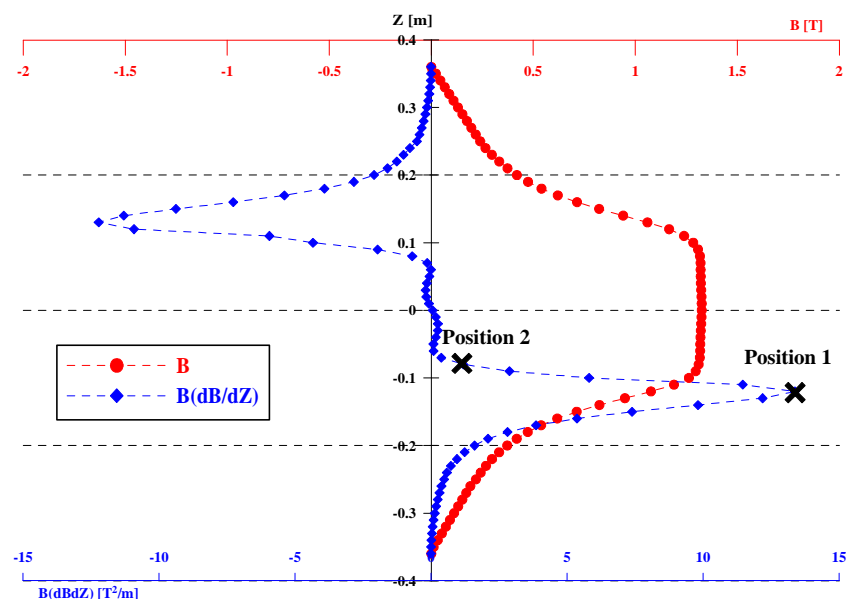
FIG. 2 – Brûleur

L'ensemble du brûleur est placé dans un électroaimant dont l'intensité du champ magnétique peut varier entre 0T et 1,332T suivant l'alimentation électrique. Les flasques polaires ont un diamètre de 30cm et le champ magnétique obtenu est horizontal (dirigé de la gauche vers la droite suivant le schéma de la figure 1) et possède une distribution axisymétrique radiale. Les résultats présentés ici ont été obtenus avec une intensité de champ magnétique maximale.

Afin de localiser spatialement différentes positions de nos flammes, nous avons adopté un repère 0XYZ orthonormé dont l'origine se situe au milieu des flasques polaires. Dans le plan XOZ, le profil du champ magnétique selon l'axe 0Z (cf. figure 3) présente de part et d'autre de son centre un champ homogène maximal ($B=1,332T$) entre $-10cm < Z < +10cm$ puis une forte inhomogénéité entre $-35cm < Z < -10cm$ et $+10cm < Z < +35cm$. Il existe alors 2 gradients maximaux ($B dB/dZ = \pm 12,19T^2/m$) localisés à $Z = \pm 13,5cm$.

Dans notre étude, l'axe du brûleur se situe sur l'axe 0Z et 2 positions de la section de sortie du brûleur ont été utilisées :

- 1^{ère} position : section de sortie en $X=0$, $Y=0$ et $Z = -13,5cm$ (position où le gradient du champ magnétique est maximal et positif : $B dB/dZ = +12,19T^2/m$);
- 2^{ème} position : section de sortie du brûleur en $X=0$, $Y=0$ et $Z = -8,5cm$ (position où le gradient du champ magnétique est égal à : $B dB/dZ = +1,902T^2/m$).

FIG. 3 – Champ et gradient magnétique sur l'axe vertical OZ ($X=0$, $Y=0$)

Différentes expériences ont été menées afin de révéler l'influence du champ magnétique sur le comportement de la flamme de diffusion placée dans l'air ambiant à la pression atmosphérique. Pour ce faire, les procédures d'exploration expérimentale ont été les suivantes : pour un débit de CH_4 donné, le débit d'air fut progressivement augmenté pour déceler les variations du décollement de la flamme (ou « lift ») du brûleur jusqu'à la limite du soufflage de la flamme (ou « blow-out »). Les conditions expérimentales sont résumées dans le tableau 1.

	Faibles Régimes	Forts Régimes
Q_{VCH_4} (cm^3/s)	1,5 à 8,5 cm^3/s	20 à 70 cm^3/s
Q_{Vair} (cm^3/s)	0 à 80 cm^3/s	0 à 245 cm^3/s
U_{CH_4} (m/s)	0,12 à 0,72 m/s	1,59 à 5,57 m/s
U_{air} (m/s)	0 à 6,37 m/s	0 à 19,5 m/s
Re_{CH_4}	28 à 166	369 à 1289
Re_{air}	0 à 2002	0 à 6131
Richesse : Φ	$0,18 \leq \Phi \leq 8$	$0,77 \leq \Phi \leq 13$

TABLEAU 1 – Conditions expérimentales

Les nombres de Reynolds de jets sont définis à partir des vitesses moyennes des jets de gaz (U_{CH_4} ou U_{air}), les diamètres débitants de sortie des jets ($D_{\text{CH}_4}=4\text{mm}$ et $D_{\text{air}}=5\text{mm}$) et les viscosités cinématiques des gaz dans les conditions ambiantes ($\nu_{\text{CH}_4} = 1,73 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ et $\nu_{\text{air}} = 1,59 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$). Nous avons dissocié 2 cas dans l'étude (faibles régimes et forts régimes) car le comportement des flammes associées présentent de réelles différences en terme de lift, structure, blow-out, longueur de flamme, épanouissement... sans ou avec l'action du champ magnétique (cf. figures 4.a et 4.b). Nos cas d'étude permettent d'avoir une large gamme de conditions aérodynamiques (du laminaire au turbulent) et les conditions de formation des flammes évoluent entre des conditions très pauvres à très riches.

Afin d'obtenir des données qualitatives et quantitatives, nous avons opté pour des visualisations volumiques en lumière blanche et des visualisations tomographiques (dans le plan XOZ) obtenues à partir de tomographies laser. Dans le cas des tomographies laser, le système est composé d'un laser à impulsions Nd:YAG Minilite Continuum. Le faisceau laser traverse un montage optique constitué de lentilles sphéro-cylindriques permettant un éclatement de la nappe laser sur une hauteur de 500mm et d'épaisseur 1mm. Dans ce contexte expérimental de visualisations tomographiques, le jet d'air estensemencé d'encens et le jet de méthane de particules de silice de diamètre moyen 20nm. L'acquisition des images a été obtenues par

caméra CCD et le traitement et l'analyse numérique des images par différents logiciels informatiques de traitement d'images (comme, par exemple, « Spotlight 16 »)

Pour l'ensemble des visualisations, et afin d'obtenir différentes grandeurs géométriques, l'analyse d'images a reposé sur un ensemble de 750 images et ce sont les valeurs moyennes géométriques qui ont servi à la compréhension des processus.

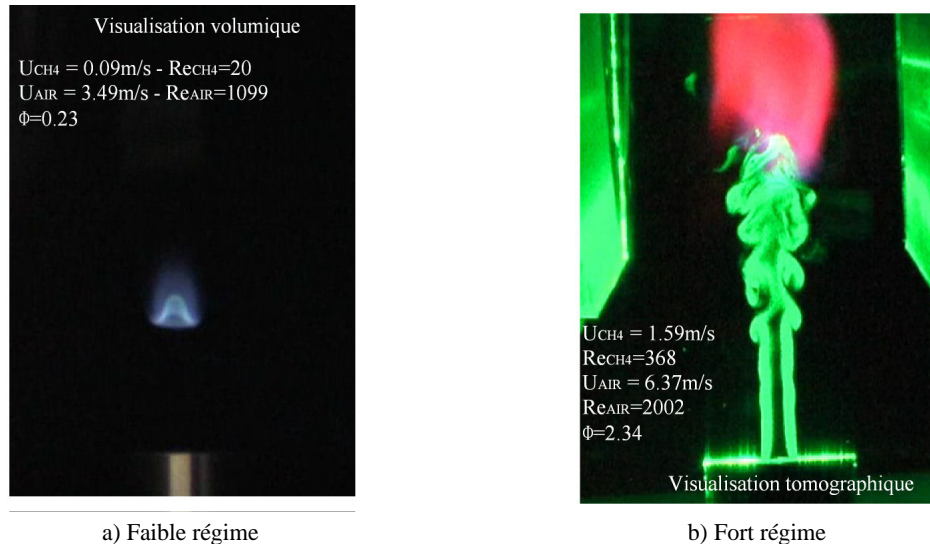


FIG. 4 – Exemples de comportement de flamme à $Z = -13,5 \text{ cm}$ et champ magnétique ($B_{max} = 1,332 \text{ T}$)

3 Analyse des résultats

Avec ou sans champ magnétique, et quelle que soit la position du brûleur, nous avons pu constater 2 types d'évolution de la flamme différentes suivant nos cas d'étude :

- Faibles régimes (figure 5):

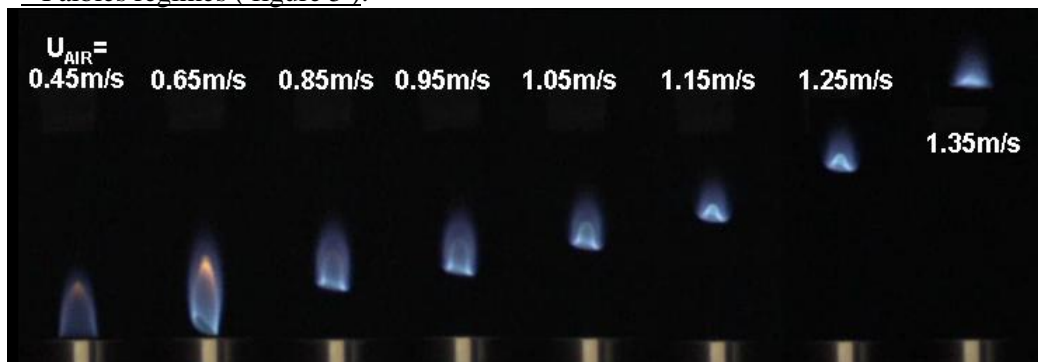


FIG. 5 – Exemples de comportement de flamme à $Z = -13,5 \text{ cm}$ sans champ magnétique avec $U_{CH_4} = 0.19 \text{ m/s}$

Dans ces cas de configuration, la flamme reste tout d'abord accrochée au brûleur puis à partir d'un seuil de débit d'air correspondant à une vitesse moyenne de $0,6 \text{ m/s}$, l'accroissement du débit d'air entraîne l'augmentation du décollement de flamme. Lorsque la flamme est décollée, elle adopte un comportement de type flamme triple (avec zone de prémélange entre la flamme et le brûleur). Ce comportement sera identique jusqu'à ce que le débit d'air soit suffisant pour que l'on observe l'écrasement quasi-total de la base de la flamme précurseur de son soufflage. Pour ces faibles régimes, en aucun cas il n'apparaît de fortes perturbations de la flamme qui semble donc plutôt se comporter comme une flamme de diffusion laminaire.

En ce qui concerne l'évolution de la hauteur de lift (position géométrique de la flamme par rapport à la section de sortie du brûleur), la figure 6 présente quelques résultats obtenus avec et sans la présence du champ magnétique avec une position de sortie du brûleur située à $Z = -13,5 \text{ cm}$ de l'origine. A faibles régimes, le lift de la flamme présente deux types

d'évolutions : lorsque la vitesse du méthane est de 0,11 m/s, on constate un lift très faible et qui n'est absolument pas modifié par la présence du champ magnétique. En fait, pour ce type d'évolution, la flamme semble être confiné près du brûleur par la présence d'un tourbillon stable (tourbillon révélé par une simulation numérique) dans le jet de méthane et dû à la différence de vitesse existante entre le jet de méthane et le jet d'air.

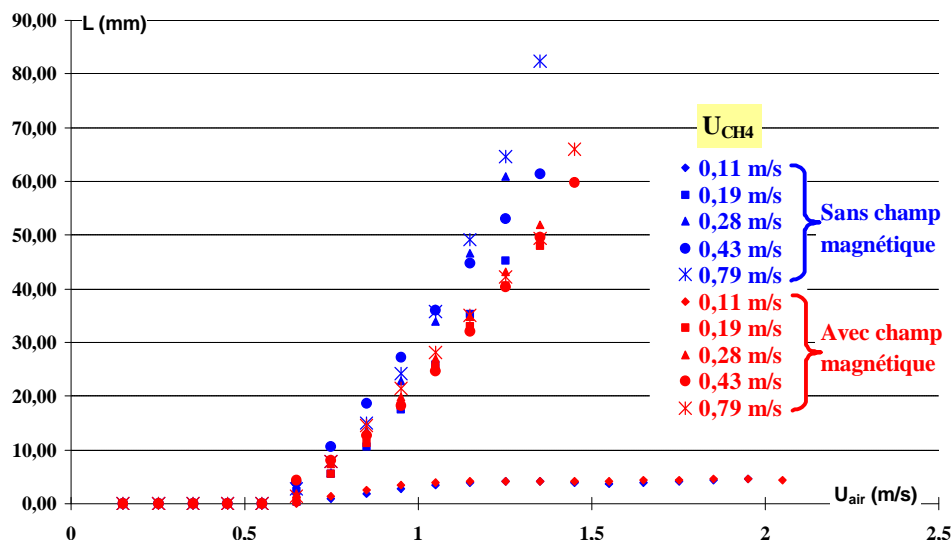


FIG. 6 – Evolution du lift de la flamme en fonction de la vitesse moyenne de l'air pour différentes vitesses de méthane : $Z = -13.5$ cm avec et sans champ magnétique

Pour des vitesses de méthane plus élevées, on constate un deuxième type d'évolution qui montre un accroissement du lift avec l'accroissement de la vitesse du méthane sans présence du champ magnétique et ceci jusqu'au soufflage de la flamme ou « blow-out » au fur et à mesure qu'il y a augmentation de la vitesse de l'air. Une différence importante apparaît avec champ magnétique (on rappelle ici que l'intensité du champ magnétique est maximal est égal à 1,332T et que dans cette configuration, la sortie du brûleur est situé au gradient positif maximal est égal à $B(dB/dZ) = +12,19T^2/m$). Si l'on constate encore un accroissement du lift avec l'augmentation de la vitesse moyenne de l'air, on remarque d'une part que la dépendance vis-à-vis du CH_4 n'apparaît plus et d'autre part, une réduction de la hauteur de lift par rapport au cas sans champ magnétique. Il semblerait donc que l'action du champ magnétique agisse, à ces faibles régimes, au niveau de la zone de prémélange de la flamme triple en favorisant le mélange des 2 gaz (phénomène constaté par une stabilisation de la valeur du lift quel que soit le jet de méthane).

• Forts régimes (figure 7) :

Si le comportement de la flamme à faibles régimes est celle d'une flamme laminaire quel que soit les débits rencontrés, dans le cas des forts régimes sans et avec champ magnétique, la flamme est tout d'abord laminaire puis évolue vers une flamme turbulente. Les visualisations tomographiques montrent notamment les fortes instabilités qui perturbent les couches de mélanges entre le jet d'air et le jet de méthane et conduisent progressivement à une déstabilisation de l'écoulement (cf. figure 4.b). La figure 7 montre ainsi pour ces forts régimes, un comportement de flamme qui se manifeste très rapidement par une flamme décollée du brûleur et dont la position par rapport à la sortie du brûleur croît avec la vitesse de l'air jusqu'à une valeur critique de la vitesse de l'air pour laquelle on constate une forte perturbation de la base de la flamme -précurseur de la transition vers la turbulence- et provoquant, figure 8, un lift de flamme qui se stabilise. A partir de cette vitesse, on constate alors un fort épanouissement de la flamme avec passage fréquent de flammelettes et le lift de la flamme croît alors de manière plus faible jusqu'au soufflage de la flamme.

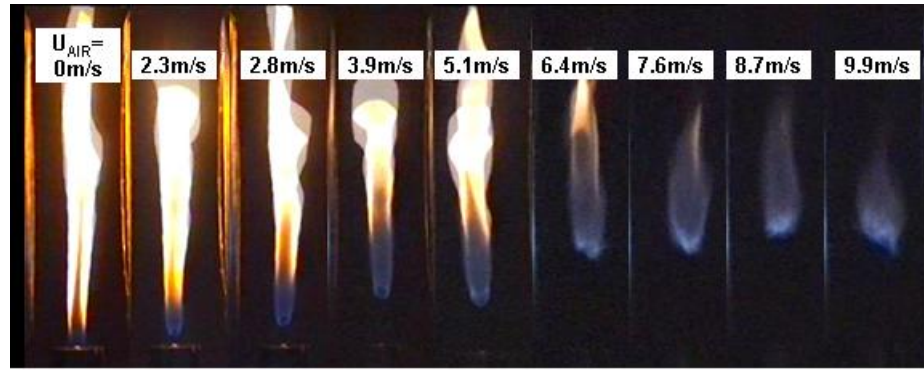


FIG. 7 – Exemples de comportement de flamme à $Z = -8,5\text{cm}$ avec champ magnétique avec $U_{CH_4} = 2,4\text{m/s}$

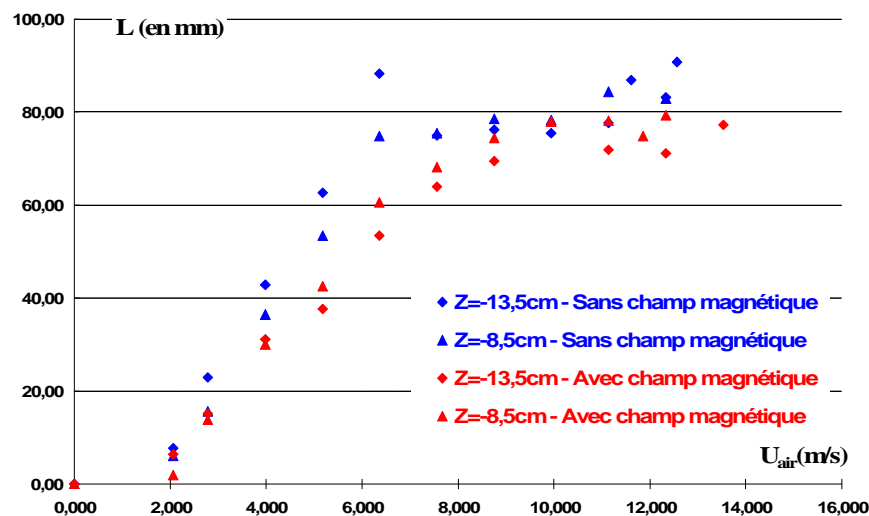


FIG. 8 – Evolution du lift de la flamme en fonction de la vitesse moyenne de l'air pour $U_{CH_4} = 2,4\text{m/s}$ avec sortie du brûleur : $Z = -13,5$ et $Z = -8,5\text{ cm}$ avec et sans champ magnétique

La figure 8 illustre typiquement les résultats obtenus dans la gamme de vitesse de méthane étudiée. La stabilisation de la flamme à une hauteur plus faible lorsque le brûleur est situé à $Z = -8,5\text{cm}$ de l'origine par rapport à sa position à $Z = -13,5\text{cm}$ indique que le confinement accentue le processus de mélange entre le méthane et l'air et à donc un rôle stabilisateur sur le processus de combustion. Si cet effet est encore remarqué et accentué par la présence du champ magnétique, on constate une plus forte réduction du lift lorsque le brûleur à sa section de sortie localisée où le gradient magnétique est le plus important. L'action du champ magnétique contribue donc à un meilleur mélange des deux gaz en attirant vers l'axe du brûleur l'oxygène à caractère paramagnétique contenu dans le jet d'air et dans l'air ambiant.

Références

- Faraday, M. 1847, On the diamagnetic conditions of flame and gases, The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 31(210), 401-421
- Ueno, S., Harada, K. 1987, Effects of magnetic fields on flames and gas flow, IEE Trans. On Mag., 23 (5), 2752-2754
- Mizutani, Y., Fuchihata, M., Ohkura, Y. 2001, Pre-mixed laminar flames in a uniform magnetic field, Combustion and Flame 125,1071-1073
- Yamada, E., Shinoda, M., Yamashita, H. and Kitagawa, K. 2003 Experimental and numerical analyses of magnetic effect on OH radical distribution in a hydrogen-oxygen diffusion flame Combustion and flame, 135, 365.

Remerciements : Les auteurs remercient A.AYMARD pour son aide technique.